



Output 2 | Actividad 2.3

## **Herramientas de modelación para la gestión costera de la provincia de Buenos Aires**

Español

[INFORME 2.3 – 4 Febrero 2019 - UNIDO/CTCN Rfx 7000002437](#)

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina) | Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República (IMFIA-UdelaR, Uruguay)

[Technologies for the design of a regional strategic plan for the coastal management and adaptation to Climate Change in the Province of Buenos Aires](#)

## **Equipo de trabajo**

*Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina)*

Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Pablo E. García | Lucas Bindelli | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Msc. Ing. Nicolás J. Tomazin | Lic. Carlos Haspert | Arq. Leonardo S. Peralta | Lic. Federico Haspert

*Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de*

Dr. Ing. Mónica Fossati | Dr. Ing. Sebastián Solari | Dr. Ing. Pablo Santoro | Msc. Ing. Rodrigo Alonso | Ing. Michelle Jackson

## **Informe realizado por:**

Nicolás Tomazin y Mariano Re.

## Resumen

La modelación numérica se ha convertido en herramienta esencial para cuantificar riesgos asociados a diferentes amenazas en la gestión costera como así también para analizar el impacto de obras de infraestructura y diferentes escenarios futuros (especialmente asociados al cambio climático). En función del problema físico que representan, los modelos son hidrodinámicos, sedimentológicos y morfológicos. Estos modelos pueden ser utilizados en forma independiente o acoplados entre sí.

Con el objetivo de encarar la gestión costera con las mejores herramientas disponibles en la actualidad, el Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) de la provincia de Buenos Aires adquirió durante 2013 las licencias para el uso de dos paquetes de software desarrollados por el Danish Hydraulics Institute (DHI, Dinamarca): MIKE 21, que es un sistema para el modelado bidimensional de procesos costeros, y LITPACK, que es un módulo de simulación de procesos litorales y evolución de línea de costa. Ambas aplicaciones son reconocidas internacionalmente y forman parte del estado de la técnica de modelado numérico de problemas de ingeniería costera.

Este informe contiene una revisión sobre las prestaciones actuales de esas herramientas: Sistema MIKE 21 (modelación bidimensional hidrodinámica, sedimentológica y morfológica costera) y Sistema LITPACK (modelación de la evolución de la línea de costa). El análisis de cada una de ellas se realizó en perspectiva de las posibles implementaciones que puede demandar la gestión costera de la provincia de Buenos Aires.

De manera adicional a la evaluación específica de estas herramientas de modelación, se proponen modelos alternativos que pueden ser implementados a modo de complemento del software ya adquirido por la DPH: Delft-3D (sistema de modelación acoplado compuesto por varios módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, transporte de sedimentos, calidad de agua y transporte de sustancias en general), SWAN (modelo de propagación de olas de tercera generación que permite estimar los parámetros del oleaje en zonas costeras, lagos y estuarios, teniendo en cuenta las condiciones del viento, del fondo y de la corriente) y XBeach (modelo hidrodinámico y morfodinámico costero que evalúa el impacto de eventos de tormenta).

El criterio de complementariedad de estos modelos se sostiene en la libre disponibilidad de los mismos y el importante grado de avance tecnológico que han tenido en los últimos tiempos. Además, esta propuesta se basa tanto en la experiencia previa desarrollada por el INA en la aplicación de algunos de estos modelos, como también en los casos documentados en la revisión de experiencias internacionales (ver producto D2.1 de la asistencia técnica).

## Índice

1	Introducción .....	5
1.1	Problema .....	5
1.2	Asistencia técnica .....	6
1.3	Actividad 2.2.....	6
2	Sistema Mike 21: modelación bidimensional hidrodinámica, sedimentológica y morfológica costera .....	8
2.1	Módulo hidrodinámico MIKE 21 HD.....	8
2.2	Modelo espectral de olas MIKE 21 SW .....	10
2.3	Módulo de transporte de sedimentos MIKE 21 ST .....	11
2.4	Modelo morfológico acoplado .....	12
2.5	Perspectivas sobre la aplicación de MIKE 21 en la costa bonaerense .....	15
3	Sistema LITPACK: modelación de la evolución de la línea de costa.....	22
3.1	Módulo LITDRIFT .....	23
3.2	Módulo LITLINE .....	24
3.3	Ejemplos de aplicación de LITPACK.....	24
3.4	Perspectivas sobre la aplicación de LITPACK al estudio de la costa bonaerense.....	25
4	Modelos complementarios para la gestión del manejo costero .....	29
4.1	Delft-3D .....	29
	Motivaciones para el uso de Delft-3D en este estudio .....	30
4.2	SWAN .....	32
	Motivaciones para el uso de SWAN en este estudio .....	33
4.3	XBeach.....	34
	Motivaciones para el uso de XBeach en este estudio.....	35
5	Conclusiones.....	37

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 400 km, con diferentes regímenes de oleaje, mareas, y con composiciones granulométricas y morfológicas variables. Entre San Clemente, al NE, y Pehuén-Co, al SO, se concentran más de 30 localidades balnearias que pertenecen a 12 partidos de la provincia (Figura 1.1). Los municipios presentan importantes diferencias en cuanto a cantidad de población y actividades económicas. Principalmente se destacan actividades asociadas al turismo y actividades comerciales vinculadas al movimiento de los puertos.

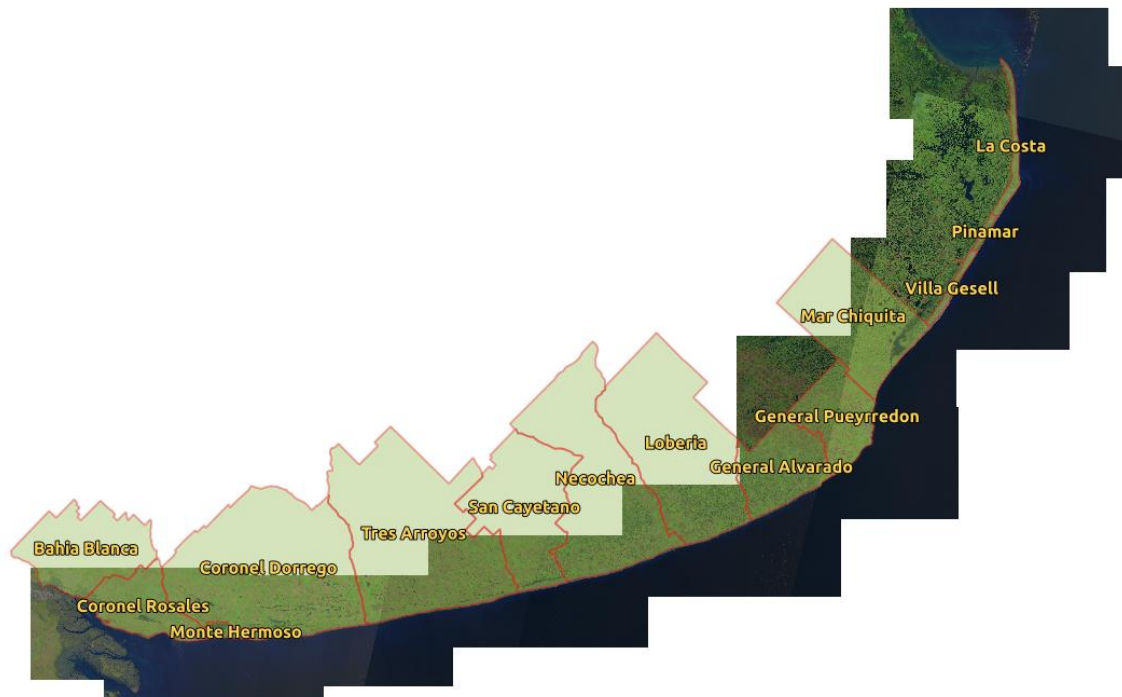


Figura 1.1. Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

Esta región litoral se ve afectada por numerosos problemas ambientales y climáticos, principalmente por la erosión costera. Las actividades antrópicas como la construcción de defensas costeras, el crecimiento urbano sobre estructuras medanosas, la extracción de arena y la explotación de acuíferos sin un apropiado manejo han agravado los procesos erosivos y acrecentado la vulnerabilidad frente al Cambio Climático.

La constante acción del oleaje y el impacto de los eventos de tormenta severos (Sudestadas) son los responsables primarios de la dinámica erosiva de la costa bonaerense. Estudios referidos a obras puntuales como la instalación de rompeolas para prevenir erosión en la zona

de acantilados en Mar del Plata, la ejecución de defensas costeras para protección de rutas o los planes de modificación de una de las escolleras del Puerto de Mar del Plata refuerzan la necesidad de contar con un manejo costero integral y planificado. Resulta en este contexto que se plantea la preocupación de la provincia de Buenos Aires respecto de la vulnerabilidad de la costa ante las distintas amenazas que afectarían su dinámica en el marco del Cambio Climático.

## **1.2 Asistencia técnica**

El análisis de los procesos costeros naturales (meteorología, climatología, hidrodinámica, morfología) en relación a los cambios en las actividades humanas y del uso/cobertura del suelo, resulta un insumo necesario para el estudio del riesgo a la erosión costera de manera integral y la generación de información necesaria para la concreción de un plan integral de manejo costero bonaerense.

En este marco, el Departamento de Costa Marítima de la Provincia de Buenos Aires, a través del Punto focal designado (END) ante el CTCN localizado en el Ministro de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, solicitó la Asistencia Técnica a CTCN (Climate Technology Center & Network) que plantea dos objetivos generales: i) diagnosticar el estado actual de la dinámica en la costa oceánica de la provincia, e ii) implementar un mapa de riesgo frente al Cambio Climático y delinear recomendaciones de manejo costero, para utilizar como insumo en la ejecución de un Plan de Manejo Integral Estratégico de la costa bonaerense a desarrollarse a futuro.

Entre los objetivos específicos a alcanzar por esta Asistencia Técnica se destacan: i) determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera durante las últimas décadas (nivel del mar, oleaje, viento, cambios morfológicos), ii) estimar a partir de proyecciones de Cambio Climático los posibles escenarios costeros futuros, y iii) desarrollar labores de transferencia tecnológica, capacitación y formación asociadas al proyecto. Entre los principales productos de esta asistencia se destacan la puesta en valor de las herramientas de modelación numérica del solicitante, la capacitación y entrenamiento en el manejo de las mismas y la elaboración de un manual de recomendaciones de manejo costero para la costa oceánica de Buenos Aires.

Esta Asistencia Técnica se lleva a cabo con los equipos profesionales del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina y el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelAR) de Uruguay.

## **1.3 Actividad 2.2**

La Actividad 2.2 de esta Asistencia Técnica se enmarca dentro del Entregable 2, en el que se realiza una revisión y análisis del estado del arte de las herramientas tecnológicas que se utilizan para evaluar las alternativas de infraestructura costera.

El principal objetivo de este informe (D2.3) consiste desarrollar una revisión sobre las prestaciones actuales de las herramientas adquiridas por el Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) en 2013, en función de las diferentes implementaciones que puede demandar la gestión costera, identificando las mejoras necesarias. El análisis de detalle de los dos conjuntos de herramientas numéricas con que cuenta la DPH, Sistema MIKE 21 (modelación bidimensional hidrodinámica, sedimentológica y morfológica costera) y Sistema LITPACK (modelación de la evolución de la línea de costa), se desarrollan en los capítulos 2 y 3 respectivamente.

Este documento también incluye un conjunto de recomendaciones para abordar las necesidades identificadas, teniendo también en cuenta los resultados de la Actividad 2.1.

## 2 SISTEMA MIKE 21: MODELACIÓN BIDIMENSIONAL HIDRODINÁMICA, SEDIMENTOLÓGICA Y MORFOLÓGICA COSTERA

Durante 2013, el Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) adquirió un conjunto de licencias, actualmente vigentes, del sistema de modelación MIKE 21 con el objetivo de acompañar la gestión costera con herramientas computacionales. Su utilización fue acotada por lo que se requiere que en el marco de esta Asistencia Técnica estas herramientas se revaloricen.

El sistema de modelación MIKE 21 de la empresa Danish Hydraulics Institute (DHI, Dinamarca<sup>1</sup>) está compuesto por un módulo de simulación de flujo o modelo hidrodinámico (MIKE 21 HD), un modelo espectral de olas (MIKE 21 SW) y módulo de transporte de sedimentos (MIKE 21 ST).

Este sistema integrado permite combinar los procesos físicos de las olas, las corrientes y el transporte de sedimentos en un solo modelo morfológico. De esta manera, el modelo puede ser usado para el estudio de la evolución morfológica de zonas costeras debido al impacto de obras de ingeniería, tales como rompeolas sumergidos o emergidos, espigones, rellenos de playas, infraestructura portuaria, entre otros.

El esquema numérico utilizado para resolver la evolución temporal del sistema de ecuaciones no lineales de continuidad y cantidad de movimiento en las tres dimensiones, es mediante técnicas en diferencias finitas. Asimismo, la versión del modelo con malla flexible utiliza un método en volúmenes finitos centrado para discretizar el flujo y las ecuaciones de transporte. En el plano horizontal (coordenadas esféricas o cartesianas), se emplea una malla no estructurada a base de elementos triangulares y/o cuadrangulares. Los módulos de olas, flujo y transporte de sedimentos se describen en detalle en DHI (2012a, b, c) y, por lo tanto, a continuación se presenta sólo brevemente una descripción de cada componente.

### 2.1 Módulo hidrodinámico MIKE 21 HD

El módulo hidrodinámico calcula las variaciones del nivel del agua y flujo teniendo en cuenta las variaciones de densidad, batimetría y forzamientos externos. Proporciona la base para cálculos realizados por otros módulos, pero también se puede utilizar solo.

Dicho módulo permite simular los siguientes efectos:

---

<sup>1</sup> <https://www.dhigroup.com/>

- Secado y mojado
- Dispersión de cantidad de movimiento por fluctuaciones turbulentas
- Tensiones de corte sobre el fondo
- Fuerza de Coriolis
- Tensiones de corte sobre la superficie libre debidas al viento
- Gradientes de presión barométrica
- Efecto del hielo
- Flujos potenciales de mareas
- Precipitación/evaporación
- Tensiones radiantes por olas
- Fuentes y sumideros

El modelo está basado en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes con la aproximación de Reynolds (descomposición de las variables de flujo en su valor medio más la fluctuación). Asimismo, se asume la hipótesis Boussinesq y presión hidrostática (DHI, 2012a). Este sistema de ecuaciones se conoce como RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*).

Entre los campos típicos de aplicación se pueden mencionar:

- Evaluación de las condiciones hidrográficas para diseño, construcción y explotación de estructuras y plantas en aguas estratificadas y no estratificadas.
- Estudios de evaluación de impacto ambiental
- Estudios de circulación costera y oceanográfica.
- Optimización de infraestructura portuaria y de protección costera.
- Análisis de condiciones hidrodinámicas en lagos y reservorios
- Estudios de refrigeración de agua, recirculación y desalinización.
- Inundación costera y propagación de ondas de tormenta.
- Inundaciones interiores y modelación de flujos en cuencas hidrográficas.
- Sistemas de previsión y alerta.

Entre las numerosas aplicaciones de MIKE 21 HD que pueden encontrarse en la literatura internacional cabe destacar el trabajos mencionados en la revisión del estado del arte presentada en la Actividad 2.1 de esta Asistencia Técnica por ser éstos de interés directo para el estudio: Kumar et al. (2008), realizaron simulaciones del impacto de la marea meteorológica (*storm surge*) en las costas del Océano Índico; y Samaras et al. (2016) donde se presentan diversas modelaciones hidrodinámicas en el sur de Italia con el objetivo de tener aplicaciones operativas para la planificación costera, la toma de decisiones y evaluación del riesgo costero.

En el ámbito local se cuenta con antecedentes de aplicación de MIKE 21 HD en la costa de la provincia de Buenos Aires, siendo utilizado en la zona estuarina, donde Menéndez et al. (2013) simularon la hidrodinámica del Río de la Plata para la evaluación de las descargas contaminantes sobre el mismo.

## 2.2 Modelo espectral de olas MIKE 21 SW

El modelo espectral del oleaje simula el crecimiento, decaimiento y transformación de olas locales generadas por viento y olas oceánicas (DHI, 2012b). Este modelo puede resolver los siguientes procesos:

- Generación de olas por las fuerzas inducidas por el viento.
- Interacción no lineal de olas.
- Disipación por decrestamiento (*whitecapping*).
- Disipación por fricción de fondo.
- Disipación por rotura de ola en zonas de poca profundidad.
- Refracción y asomeramiento por variación de profundidad y corrientes.
- Interacción ola-corrientes.
- Efecto de variación temporal de profundidad y corrientes.
- Efecto de cobertura de hielo en el campo de olas.
- Difracción de olas (parametrizado).
- Reflexión de olas (parametrizado).
- Influencia de pilas en muelles u otras estructuras como la fundación de turbinas de viento.

Debido a que utiliza una malla de cálculo en elementos finitos, irregular y flexible, MIKE 21 SW es particularmente recomendable para la modelación de olas a escala regional y local simultáneamente; utilizando una malla de resolución espacial gruesa para la representación regional y una malla de mayor resolución para representar el ambiente cercano a la costa y a las estructuras a modelar.

Las olas generadas por viento están representadas mediante el espectro de densidad de acción de ola  $N(\sigma, \beta)$ , donde  $\sigma=2\pi f$  es la frecuencia relativa y  $\beta$  es la dirección de propagación del oleaje. La densidad de acción del oleaje está relacionada con la densidad de energía  $E(\sigma, \beta)$ , la cual representa energía cinética más potencial por unidad de superficie.

Asimismo, dado que este modelo puede acoplarse con otros módulos de MIKE 21 hace factible:

- Acoplamiento dinámico de cálculo de flujo y olas.
- Evolución completa de cambios en el nivel de fondo en cálculos de flujo y olas.
- Fácil cambio entre cálculo 2D y 3D.
- Grado óptimo de flexibilidad en la descripción batimétrica y ambiente de flujo y condiciones de ola utilizando una malla irregular.

La revisión bibliográfica sobre aplicaciones de MIKE 21 SW destaca el trabajo realizado por Alfredini et al. (2014), donde se presenta un estudio del clima de olas para condiciones extremas esperadas bajo diferentes escenarios de cambio climático para el área metropolitana del puerto de Santos en la costa de São Paulo (Brasil). En esta investigación se realizó un análisis de una base de datos de oleaje de largo plazo (1957–2002) generada a partir de una

comparación entre datos de olas modelados en un modelo de aguas profundas (*ERA-40 Wave model - ECMWF*) y datos de olas medidos por una boya costera, durante los años 1982–1984, en el litoral del puerto. Los coeficientes de calibración, según los sectores angulares de la dirección de la onda, se obtuvieron comparando los datos medidos con los datos modelados y aplicándolos a los escenarios originales utilizando un modelo de modelo hidrodinámico en el entorno del puerto.

Abdollahzadeh moradi et al. (2014) muestran otro caso de interés, aplicando MIKE 21 SW para analizar el potencial de la energía de las olas del Mar de Mármara. En este estudio se utilizan datos de viento generados por el modelo de pronóstico del centro europeo ECMWF con el propósito de reproducir series cronológicas del oleaje durante para el año 2012. Además se cuenta con datos de olas observados durante dos meses en la estación Ambarlı, los cuales son empleados para la calibración del modelo.

### **2.3 Módulo de transporte de sedimentos MIKE 21 ST**

El módulo no cohesivo MIKE 21 ST puede calcular la tasa de transporte de sedimentos y los cambios en la elevación del lecho marino debido a la acción combinada de olas y corrientes. Dichas tasas se calculan mediante la interpolación lineal de una tabla de transporte de sedimentos elaborada previamente mediante una herramienta de MIKE 21. El núcleo de este programa es un modelo de transporte de sedimentos cuasi-3D (STP Q3D).

La esencia del modelo cuasi-3D es la solución del equilibrio de fuerzas en toda la columna de agua, para lo cual la velocidad promedio del flujo es determinada por integración. La variación espacial y temporal de la tensión de corte, velocidad de flujo y concentración de sedimentos se resuelve utilizando el modelo de capa límite para olas y corriente de Fredsøe (1984).

La simulación mediante MIKE21 ST permite evaluar la tasa de cambios de nivel del fondo, así como la tasa de transporte, permitiendo identificar áreas potenciales de erosión o sedimentación.

A continuación se presentan las características principales del modelo MIKE 21 ST:

- Definición constante o variable del material de fondo (por ejemplo el tamaño medio de grano y la graduación)
- Cinco teorías distintas de transporte de sedimentos en corrientes puras: Engelund y Hansen (transporte total), Engelund y Fredsøe (transporte total = fondo + en suspensión), Zyserman y Fredsøe (transporte total = fondo + en suspensión), Meyer-Peter y Müller (transporte de fondo), y Ackers y White (transporte total)
- Dos métodos de simulación de transporte por la acción combinada de olas y corrientes: un modelo determinístico del DHI transporte de sedimentos “intra-wave”, STP, y el modelo de Bijker's de transporte total de sedimentos.
- El modelo STP provee las siguientes funcionalidades a MIKE 21 ST: dirección arbitraria de propagación de las olas con respecto de las corrientes, definición si las olas se

encuentran en rompiente o no, propiedades geométricas del material de fondo (distribución granulométrica), y fondo plano o con formas de fondo.

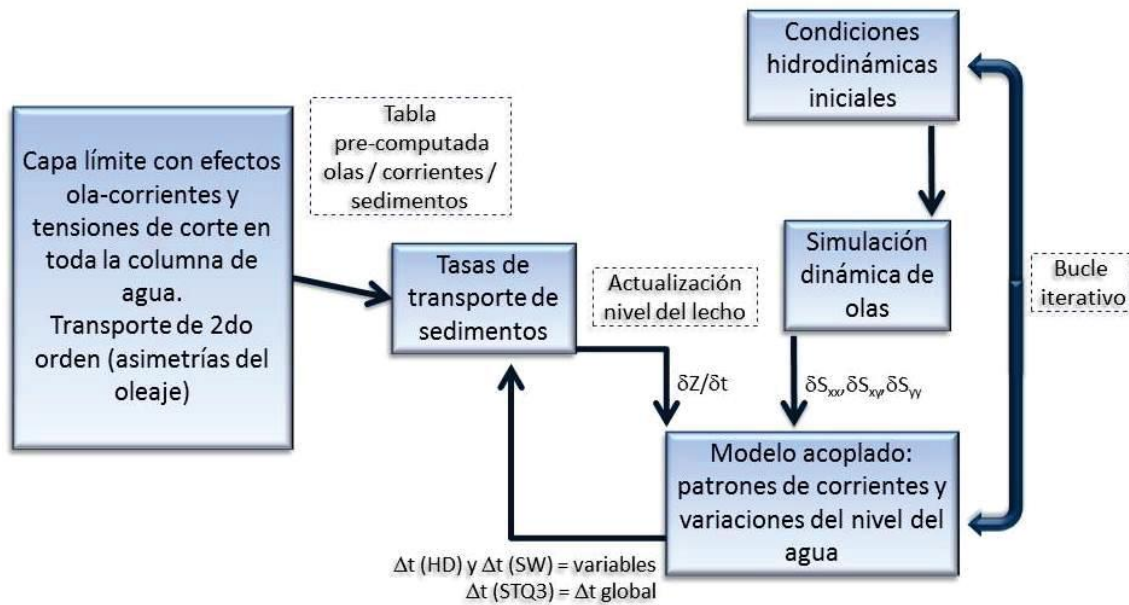
- Cuando se utiliza el modelo STP durante la acción simultánea de corrientes y olas, se encuentran disponibles dos tipos de definiciones de transporte de sedimentos: tipo bidimensional (2DH) o cuasi tridimensional (Q3D)
- Optimización de las simulaciones numéricas mediante el uso de tablas de transporte de sedimentos pre-determinadas
- Utilización de técnicas de diferencias finitas con un tipo de grilla rectangular “space-staggered”
- Utilización del criterio de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)

#### **2.4 Modelo morfológico acoplado**

Para determinar los cambios morfológicos de la superficie del lecho dentro de un área modelada puede utilizarse el Modelo Acoplado, en el cual intervienen los tres módulos mencionados anteriormente (hidrodinámico, olas, y transporte de sedimentos).

En este sistema se tienen en cuenta el acoplamiento olas/corrientes, los efectos del set-up de las olas, y las corrientes litorales que se incorporan a través de las tensiones radiantes.

Los parámetros del oleaje calculados con MIKE 21 SW, así como las corrientes y niveles calculados con MIKE 21 HD son transferidos internamente al modelo MIKE 21 ST para calcular las tasas de transporte de sedimentos. Durante las simulaciones de MIKE 21 ST, las tasas de transporte de sedimentos asociados a los efectos de corrientes inducidas por olas y mareas surgen de la interpolación de una tabla de sedimento pre-computada, la cual se realiza previamente con herramientas del sistema de modelación MIKE 21 (DHI, 2012c). Esta tabla de transporte de sedimentos permite la determinación de un amplio rango de combinaciones de olas/corrientes/sedimentos, de acuerdo al sitio de estudio. Asimismo, la tabla de transporte de sedimentos permite la selección de diferentes formulaciones para determinar las características del oleaje y transporte de sedimentos. El procedimiento de cálculo se sintetiza en el esquema de la Figura 2.1.

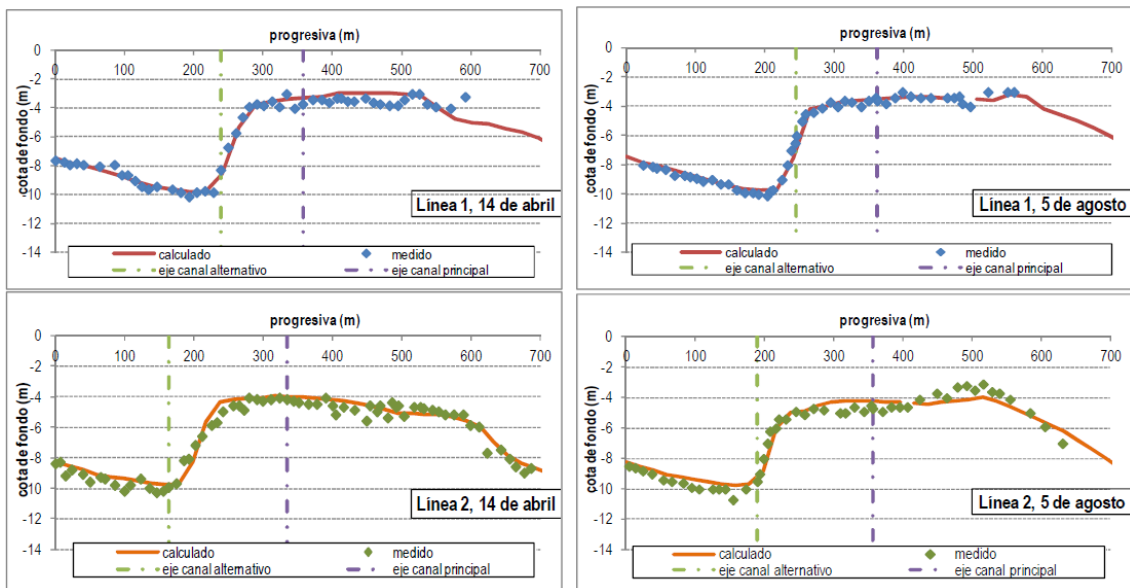


**Figura 2.1.** Esquema de cálculo para el modelo morfológico acoplado (Cáceres 2016).

Los cálculos de las tasas de transporte de sedimentos se realizan para un determinado paso de tiempo, el cual coincide con un paso de tiempo global del modelo acoplado y que es definido por el usuario. Por su parte, cada módulo de cálculo utiliza pasos de tiempo internos, que se sincronizan con dicho paso global. Estos intervalos de tiempo para los módulos hidrodinámico y espectral de olas son dinámicos y condicionados por los criterios de estabilidad, como por ejemplo condición CFL inferior a 1 para el módulo hidrodinámico debido a su esquema numérico explícito (DHI, 2012b). Finalmente, entre cada llamada al modelo MIKE 21 ST, el nivel del lecho en el modelo digital de elevación es actualizado por la extrapolación de las tasas de cambios relativos del paso anterior.

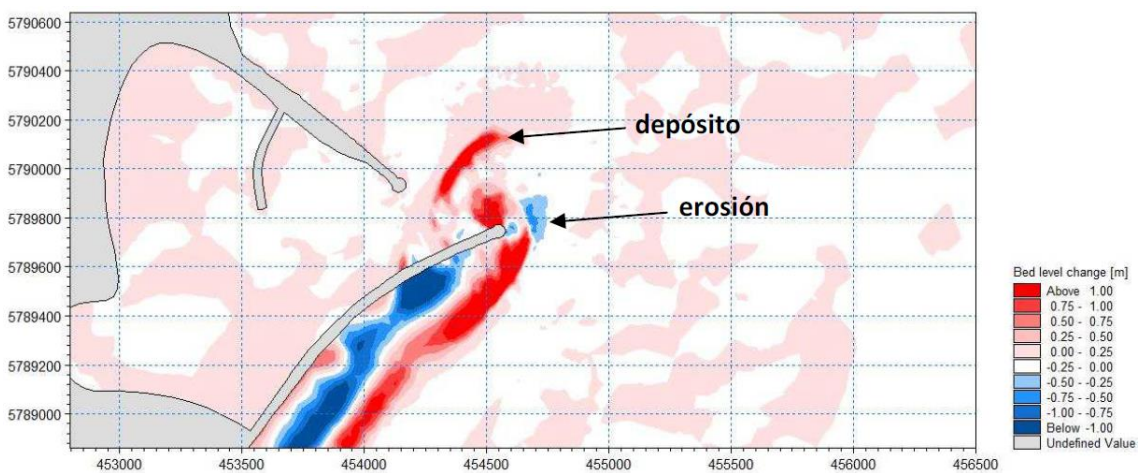
Este sistema integrado ha sido aplicado con buenos resultados como herramienta de análisis de la dinámica de sedimentos en la costa bonaerense, como se muestra en los trabajos de Cáceres et al. (2012 y 2016). En estos estudios se presentan dos casos concretos de aplicación: el primero, un análisis de la dinámica litoral en el entorno de la Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata; y el segundo, un análisis de la evolución morfológica de una playa ubicada al sur de la ciudad de Mar del Plata en presencia de estructuras de bajo coronamiento paralelas a la costa.

Para estas aplicaciones de MIKE 21, el modelo morfológico fue calibrado y validado mediante relevamientos batimétricos realizados en el entorno del acceso portuario (Figura 2.2), mostrando una buena concordancia entre los perfiles relevados y los perfiles obtenidos como resultado de la modelación.



**Figura 2.2.** Perfiles del banco de arena calculados con el modelo numérico y valores medidos en los relevamientos del 14/04/2009 y del 05/08/2009 (Cáceres y Castellano, 2012)

Esta modelación morfológica posibilitó lograr una mayor comprensión de los principales procesos hidrodinámicos y sedimentológicos que ocurren alrededor de la entrada del puerto (Figura 2.3), así como la obtención de información potencialmente útil para el diseño de estructuras y la planificación del dragado de mantenimiento. Los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo calibrado se encuentran orientados a evaluar la eficacia que tendría una obra de dragado para restablecer la profundidad de diseño del canal.



**Figura 2.3.** Cambios relativos del nivel del fondo al 01/08/2009 en la Escollera Sur del puerto de Mar del Plata (Cáceres y Castellano, 2012)

En el segundo caso de estudio, los resultados de la aplicación de MIKE 21 permitieron identificar patrones de erosión y sedimentación en el entorno de rompeolas paralelos a la costa, tal como se observa en la Figura 2.4. Mediante la variación relativa del nivel del lecho,

en color rojo se indica sedimentación y en azul erosión. Estos resultados corresponden a una simulación continua de 6 meses de duración en la que se utilizaron como forzantes hidrodinámicos series cronológicas de olas y corrientes.

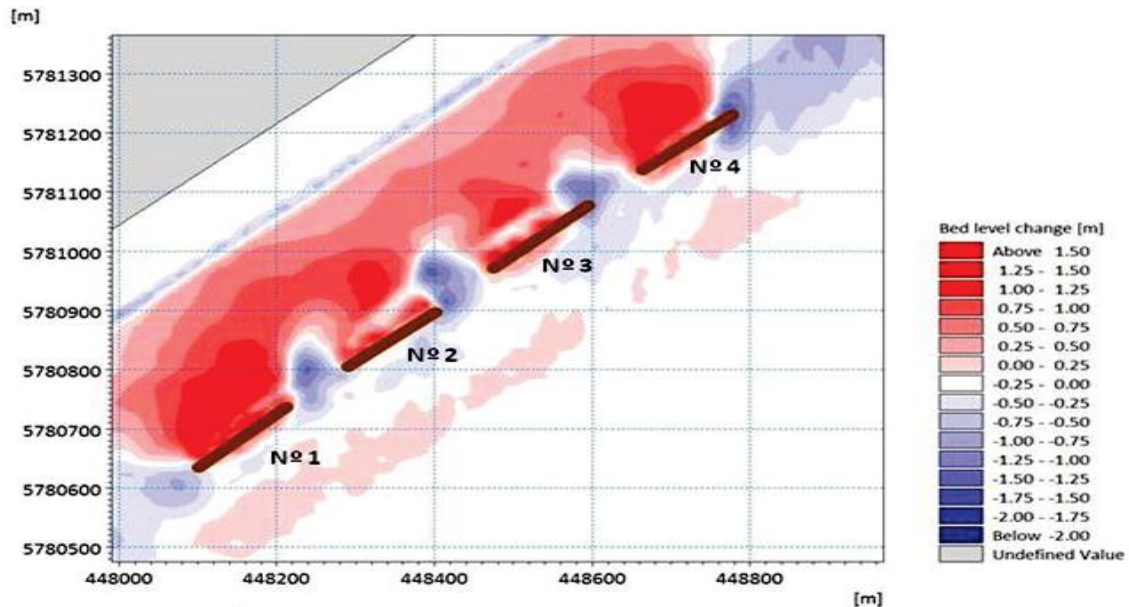


Figura 2.4. Resultados de la modelación morfológica en la playa al sur de Mar del Plata (Cáceres 2016)

## 2.5 Perspectivas sobre la aplicación de MIKE 21 en la costa bonaerense

Las perspectivas sobre la implementación de MIKE 21 para el abordaje de las problemáticas que pueden presentarse en la gestión del manejo costero de la provincia de Buenos Aires comprenden un amplio conjunto de aplicaciones potenciales que van más allá de las actividades que pueden desarrollarse dentro del marco de esta Asistencia Técnica. En tal sentido, algunos de los ejemplos presentados en esta sección podrán ser motivo de eventuales estudios encarados por el Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) en el marco de sus actividades habituales.

El módulo espectral de oleaje MIKE 21 SW tiene un amplio campo de aplicación en la región costera de la Provincia de Buenos Aires, dado que podrá ser implementado para caracterizar el clima de olas en cualquier ubicación de la zona de estudio. Las características del mismo permitirán desarrollar modelos a escala regional/local que serán utilizados para la propagación del oleaje desde zonas de aguas profundas donde se dispondrá de una base de datos convenientemente definida. Esta base de datos, que será construida mediante el desarrollo de la *Actividad 4.1* de esta Asistencia Técnica, consistirá en conjunto de “boyas virtuales” distribuidas a lo largo del frente costero bonaerense conteniendo información histórica del oleaje.

De este modo, la implementación de un modelo local desarrollado por la aplicación de MIKE 21 SW brindará la posibilidad de disponer de series cronológicas de parámetros de las olas

(alturas, dirección y períodos) en una ubicación costera determinada, que podrán ser utilizadas para identificar tanto condiciones frecuentes del oleaje como también eventos extremos, generando la información de base necesaria para una variada cantidad de aplicaciones.

Dentro de las aplicaciones que demandan a la caracterización del clima de olas frecuente pueden mencionarse como ejemplos: estudios vinculados a la operación portuaria y aspectos náuticos (donde se destacan por su interés los puertos de Mar del Plata y Quequén, Figura 2.5; análisis de transporte de sedimentos y estudios morfológicos de playas, de gran importancia para el recurso turístico; y la evaluación de sedimentación de canales, problemática presente en el Puerto de Mar del Plata; entre otros.

Algunos ejemplos de aplicaciones de MIKE 21 SW referidos a condiciones extremas del oleaje en la costa bonaerense pueden ser: evaluación y/o diseño de infraestructura portuaria y defensas costeras, las cuales se encuentran presentes a lo largo de gran parte del litoral marítimo bonaerense (Balnearios de Miramar, Mar del Plata, Santa Clara del Mar, y otros); estudios de erosión por acción de temporales, problemática observada principalmente en el Partido de la Costa; y análisis de inundabilidad por sobrepaso del oleaje en sectores ribereños.



Figura 2.5. Puerto de Quequén

El módulo hidrodinámico MIKE 21 HD también otorga la posibilidad de ser implementado en forma individual para algunas aplicaciones específicas. Del mismo modo que para el módulo de oleaje, el desarrollo de la *Actividad 4.1* permitirá contar con una base de datos que podrá ser utilizada como condición de borde para la implementación de modelos hidrodinámicos locales.

Una aplicación de interés de MIKE 21 HD consiste en el estudio de las condiciones hidrodinámicas generadas en una zona compleja de interacción entre olas y corrientes, como la que se presenta en la descarga de la laguna Mar Chiquita (Figura 2.6). La dinámica costera que caracteriza este tipo de descarga requiere un análisis de detalle en el que intervienen

como forzantes la acción de la onda de marea (alternando fases de flujo entrante y saliente) y los aportes fluviales.



**Figura 2.6.** Zona de descarga de la laguna Mar Chiquita

Otro caso de estudio que puede ser abordado mediante la implementación del mismo módulo hidrodinámico es la modelación de la propagación de ondas de tormenta. Esta problemática, caracterizada por el incremento de los niveles del mar por causas meteorológicas, ha demostrado ser un fenómeno con efectos significativos en distintos sectores de la costa bonaerense, donde a menudo los fenómenos de “sudestada” suele ocasionar inundaciones temporarias y efectos de erosión localizados (Figura 2.7).



*a) Partido de la Costa, febrero 2015.*



*b) Villa Gesell, febrero 2015*

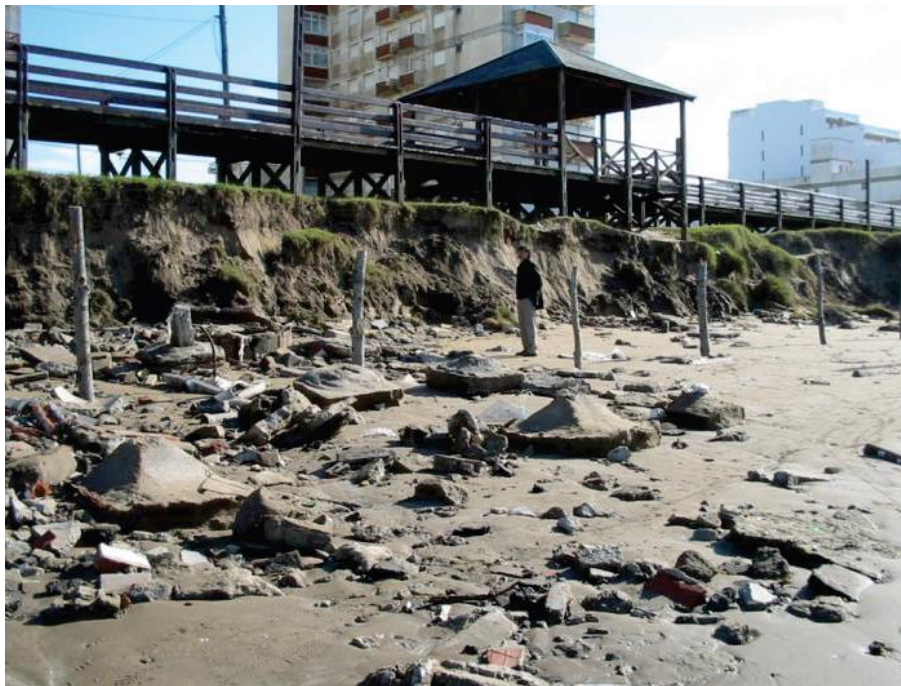
**Figura 2.7.** Efecto de una sudestada en la costa bonaerense

Más allá de las aplicaciones individuales que pueden darse para los módulos hidrodinámico y de oleaje, la combinación de éstos con el módulo sedimentológico conforman el modelo morfológico acoplado de MIKE 21, el cual constituye una herramienta fundamental para el estudio integral de aplicaciones referidas al manejo costero.

A lo largo de la costa bonaerense pueden encontrarse diferentes sectores donde existen evidencias concretas de procesos erosivos que, en algunos casos, parecen haberse incrementado en los últimos años (Figura 2.8). Las causas que dan origen a estos procesos pueden atribuirse en alguna medida a factores naturales, a la acción antrópica, o bien, a una combinación de ambos. La implementación de MIKE 21 para la modelación integral de esta problemática puede contribuir a generar un diagnóstico orientado a la identificación de los mecanismos dominantes que intervienen en estos procesos y la eventual búsqueda de soluciones mediante la evaluación de obras de defensa apropiadas a cada caso.



*a) Acantilados activos por procesos de erosión, al sur de Mar del Plata, Buenos Aires*



*b) Erosión costera en Villa Gesell, Buenos Aires*



c) Erosión costera en el Partido de la Costa

**Figura 2.8.** Sectores con evidencias de procesos erosivos en la costa bonaerense

Sumado al conjunto de aplicaciones para la modelación que apuntan a evaluar las condiciones hidrosedimentológicas actuales, se encuentra la problemática vinculada a la variabilidad y el cambio del clima.

En la comunidad científica existe un amplio consenso señalando que el cambio climático que se evidencia a nivel global tendrá consecuencias que son muy importantes para las infraestructuras marinas, zonas costeras y el medio marino. Dichas evidencias consisten en:

- Aumento de la temperatura del aire y del agua de mar.
- Aumento del nivel medio del mar.
- Cambios en las condiciones de propagación de ondas de tormenta debido a los cambios potenciales del viento y el aumento del nivel del mar.
- Posibles alteraciones del clima de olas tanto en términos de intensidad como de dirección debido a condiciones cambiantes del viento.
- Cambios en la precipitación, que afectarán (aumentan / disminuyen) la escorrentía hacia el mar.
- Incremento de la acidez en el agua debido al aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

En este contexto, la modelación numérica se presenta como una herramienta indispensable para el desarrollo de estudios orientados a evaluar el impacto que pueden tener las predicciones globales a nivel local mediante la implementación de metodologías para el análisis de reducción de escala (*downscaling*).

En consecuencia, MIKE 21 puede ser aplicado para evaluar de qué manera impactarían las predicciones referidas a escenarios futuros (modificaciones en clima de olas, regímenes de

viento, intensidad y frecuencia de mareas meteorológicas, etc.) sobre la dinámica costera actual. Los resultados de este tipo de análisis podrán ser utilizados para la identificación de zonas vulnerables por incremento de riesgos de inundación o erosión, y la toma de decisiones sobre la necesidad de adaptación o reformulación de obras de infraestructura, entre otras acciones.

### **3 SISTEMA LITPACK: MODELACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA**

El Sistema LITPACK se encuentra diseñado para abordar la problemática vinculada al análisis de los cambios morfológicos de largo plazo sobre una línea de costa, lo cual requiere una comprensión del transporte litoral en la región de estudio.

Transporte litoral es el término general aplicado para describir el transporte de sedimentos no cohesivos (generalmente arena) en la zona litoral. El transporte de sedimentos se produce cuando las olas se aproximan a la costa oblicuamente y se someten a una serie de procesos tales como refracción, asomeramiento y difracción, aumentando su pendiente y altura, hasta que finalmente rompen. Durante estos procesos gran parte del sedimento se pone en suspensión y luego es arrastrado por acción de las corrientes litorales. Por otra parte, las partículas de sedimento más grandes permanecen en el fondo del mar rodando y moviéndose.

Estos dos mecanismos de transporte se describen generalmente como el transporte en suspensión y carga de fondo, ambos procesos constituyen la deriva litoral. La magnitud de la deriva litoral depende de una serie de variables, los más relevantes son:

- Altura de las olas.
- Niveles de agua.
- Perfil de playa (geometría del perfil transversal).
- Fuentes o sumideros de sedimentos, como ríos, costas en erosión, etc.
- Tamaños de grano del sedimento.

LITPACK es una herramienta de modelación que se utiliza para el estudio de cambios morfológicos en costas con perfiles de playa cuasi-uniformes donde los cambios de la línea de costa son graduales. LITPACK permite determinar la hidrodinámica del escurrimiento producido por las olas y las corrientes, y los fenómenos responsables de los movimientos de sedimentos en la costa. Basado en estas condiciones es posible predecir la evolución natural de la línea de costa y la influencia de modificaciones debido al uso de estructuras marinas como puertos, espigones, muelles, revestimientos, etc.

LITPACK está compuesto por una serie de programas de cálculo (módulos STP, LITDRIFT y LITLINE), cuya breve descripción se observa en la

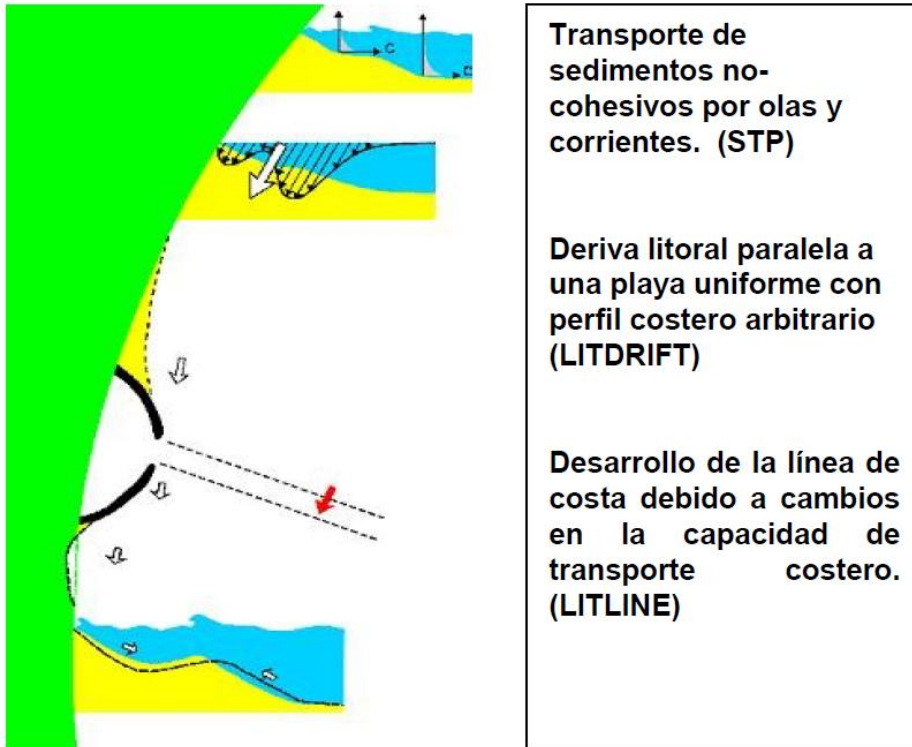
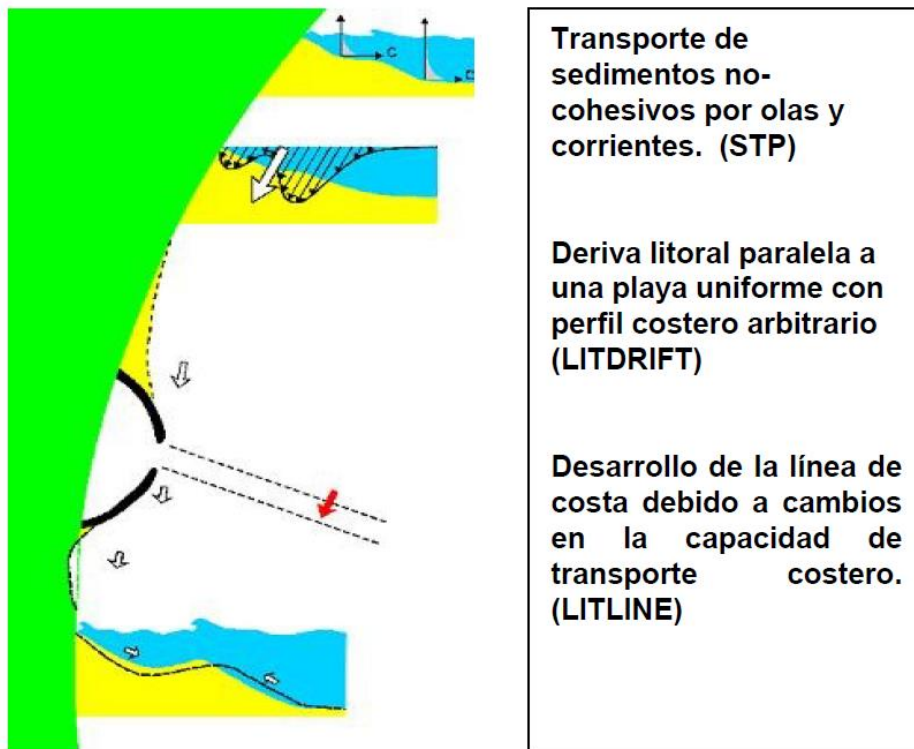


Figura 3.1. Los módulos LITDRIFT (modelo numérico determinístico integral que calcula las corrientes a lo largo de la costa, la deriva litoral y el balance de sedimentos) y LITLINE (modelo de evolución de costas) representan los procesos físicos principales de esta dinámica.



**Figura 3.1.** Plano general de los procesos que tiene en cuenta el sistema LITPACK para el cálculo de transporte de sedimentos paralelo y normal a la costa, así como el análisis de los efectos provocados por la presencia de estructuras.

### 3.1 Módulo LITDRIFT

LITDRIFT es un modelo numérico determinístico, basado en ecuaciones físicas, que permite calcular corrientes a lo largo de la costa, la deriva litoral y las variaciones de sedimento. LITDRIFT tiene dos componentes principales:

- Modelo hidrodinámico para cálculo de olas y corrientes a lo largo del perfil;
- Modelo de Procesos de Transporte de Sedimentos (STP).

Mediante el modelo LITDRIFT se lleva a cabo la modelación de tipo de 1-línea del transporte litoral. LITDRIFT calcula el transporte de sedimentos neto y bruto, y establece las bases para el cálculo de la evolución de la línea de costa en el módulo LITLINE. A través de llamadas sucesivas a LITDRIFT, el programa asociado LINTABL calcula y tabula las tasas de transporte como función de: el nivel de agua, la pendiente de la superficie de agua, las corrientes regionales, el período de ola, la altura y la dirección de la ola, sobre una línea perpendicular a la costa.

El modelo hidrodinámico incluye la descripción de la propagación y rotura de olas a partir de las forzantes debidas a las variaciones de tensión radial y al balance de momento transversal a la costa y del transporte de sedimento a lo largo de la costa. Este modelo se aplica sobre perfiles costeros complejos que incluyen características como barras y variaciones en las

características del sedimento a lo largo del perfil. Las olas pueden tratarse como regulares o irregulares y pueden incluirse como uni o multi direccionales. El modelo hidrodinámico proporciona datos de entrada para los componentes de transporte de sedimentos de LITDRIFT. De esta forma es posible calcular las condiciones de transporte de sedimentos a lo largo del perfil de playa, incluyendo tanto las condiciones de olas como las corrientes generadas por olas. Se pueden incluir otros procesos, como corrientes adicionales, efectos del viento, etc.

El módulo de transporte de sedimentos, STP, calcula el transporte de sedimentos contemplando la acción combinada de olas y corrientes. La interacción turbulenta en la capa límite cerca del fondo es determinante para establecer la tensión de corte, así como para evaluar los procesos turbulentos en la columna de agua.

### **3.2 Módulo LITLINE**

LITLINE calcula la posición de la línea de costa a partir del clima de olas representado como series de tiempo. El modelo se basa, con modificaciones menores, en la teoría de una línea, en la que se supone que el perfil transversal permanece sin cambios durante la erosión/acreción, por lo tanto, la morfología costera se describe únicamente, por la posición de la línea de costa (dirección transversal a la costa) y el perfil en una posición dada. LITLINE permite introducir cuatro tipos diferentes de estructuras: muelles, espigones, escolleras y revestimientos.

Espigones y muelles son estructuras normales a la costa (perpendiculares a la línea de referencia que usa el modelo). Ambos tienen un efecto de bloqueo directo en el transporte a lo largo de la costa generando, además, un área protegida de la acción de las olas, “olas abajo”, de la estructura. En el caso de los muelles, la capacidad de transporte en el área de abrigo incluye los efectos de difracción. Los espigones se consideran estructuras relativamente cortas, y la capacidad de transporte en el área de abrigo se calcula mediante una simple reducción de la correspondiente tasa de transporte.

El cálculo del clima de olas alrededor de las escolleras “*off-shore*” incluye los efectos de difracción, mientras que la capacidad de transporte local se calcula por interpolación en las tablas de transporte.

Los revestimientos previenen el retroceso de la línea de costa por detrás de la posición del mismo. La profundidad frente al revestimiento podría aumentar por erosión hasta alcanzar un valor cercano a la profundidad activa del perfil.

### **3.3 Ejemplos de aplicación de LITPACK**

La revisión de la bibliografía internacional muestra numerosas casos de aplicación de LITPACK. Entre ellos se pueden destacar los estudios realizados por Ari Güner et al. (2013 y 2016), en los cuales el modelo fue aplicado en la región Karaburun, Turquía, sobre la costa sudoeste del Mar Negro. La zona se caracteriza por ser una región de playas de arena con algunos sectores

vulnerables donde se proyectó un sistema de defensa mediante la construcción de espigones para revertir la tendencia actual a la erosión.

En Ari Güner et *al.* (2013) se implementó LITPACK para estimar las tasas de transporte de sedimentos en distintos sectores de la costa comparando los resultados con los obtenidos mediante formulaciones empíricas (fórmula del CERC y fórmula de Kamphuis). Estos valores fueron contrastados con tasas reales, determinadas en función de las diferencias morfológicas de volumen registradas en el lugar. Estas diferencias de volumen se obtuvieron a partir de la acumulación en el dique secundario del puerto ubicado en el extremo occidental de la playa de arena de 4 km, siendo el puerto, en este caso, una barrera de contención para los sedimentos.

En Ari Güner et *al.* (2016) se apunta a comprender la dinámica de la playa en base a los resultados del trabajo de campo y permite estudiar las respuestas de esta playa mediante simulación numérica, utilizando datos topográficos y de sedimentos obtenidos en el campo, y los datos de medidos. La validación y verificación del modelo numérico se realizó mediante mediciones de GPS diferencial e imágenes satelitales.

Otro ejemplo de interés debido a la cercanía con la problemática que caracteriza a la costa bonaerense es el caso de Hendriyono et *al.* (2015), en el que se presenta una implementación de LITPACK a lo largo de la costa de Batang, Java Central. Allí se evaluó el efecto de la construcción de nueva infraestructura costera. Esta zona muestra una retracción de la línea de costa como resultado de la severa erosión que ocurre continuamente en ubicaciones puntuales desde hace algunos años. El modelo muestra que la deriva de sedimentos paralela a la costa se produce principalmente a una distancia de hasta 300 metros de la costa. Desde 2010 hasta 2013, la tendencia general del transporte de sedimentos en el área es que existe un transporte neto de sedimentos desde la dirección oeste a este en los primeros meses del año, seguido de un período más corto de transporte en dirección opuesta (hacia el oeste) por unos pocos meses. Los resultados sugieren que el desequilibrio de esta capacidad de transporte de sedimentos es responsable de los cambios en la morfología de la costa en Batang.

### **3.4 Perspectivas sobre la aplicación de LITPACK al estudio de la costa bonaerense**

El campo de aplicación para el modelo LITPACK se enfoca en evaluaciones de largo plazo (escala de años) sobre la evolución de la línea de costa en tramos puntuales (escala local), que pueden verse afectados por alguna alteración en los procesos litorales, derivada tanto de causas antrópicas como de causas naturales.

El tramo de costa bonaerense considerado en esta Asistencia Técnica muestra a lo largo de toda su extensión una actividad muy intensa en cuanto a la dinámica litoral, con playas de arena de variado desarrollo y sectores puntuales donde la implantación de estructuras costeras (espigones, escolleras, muros, etc.) ha generado, en algunos casos, desbalances significativos en transporte natural de los sedimentos.

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 3.2, correspondiente a la localidad de Santa Clara del Mar, donde se observa un sector de erosión (retroceso de la línea de costa) ubicado a la sombra de un conjunto de espigones que generaron una alteración en los patrones naturales del transporte de sedimentos.



**Figura 3.2.** Alteración de la línea de costa en la zona de Santa Clara del Mar.

La implementación del modelo LITPACK en un caso de este tipo tiene el propósito de brindar los elementos de análisis necesarios para reducir los impactos de esta clase de estructuras sobre el entorno costero, aportando la información necesaria para un diseño apropiado de las obras.

Ejemplos similares al de la Figura 3.2 pueden encontrarse en muchos de los balnearios de la costa bonaerense, donde el intento por conservar el recurso turístico ha promovido la construcción de obras de defensa para las playa que, en algunos casos, generaron perjuicios en el entorno. LITPACK ofrece la posibilidad de verificar el funcionamiento de las estructuras construidas, al mismo tiempo que se presenta como una herramienta de gran utilidad para la planificación de nuevas obras con un enfoque integral de los procesos litorales y su entorno.

La Figura 3.3 muestra el impacto de las obras proyectadas en años recientes para proteger de un tramo costero en la zona de Los Acantilados, al sur de la ciudad de Mar del Plata. El proyecto consistió en la construcción de cuatro espigones semisumergidos paralelos a la costa, con el propósito de regenerar una zona de playa que diera protección al pie de los acantilados afectados seriamente por la acción del mar en condiciones de tormenta.



a) 07 de mayo de 2003



b) 25 de febrero de 2018

**Figura 3.3.** Evolución de la línea de costa por presencia de estructuras de defensa

La comparación entre las imágenes de la Figura 3.3 da cuenta de la evolución de la línea de costa en ese sector antes y después de la construcción de la obras. La modelación numérica aplicada a este tipo de situaciones permite evaluar un conjunto amplio de alternativas, modificando dimensiones, separación y orientación de los espigones; con el objetivo de alcanzar la configuración más conveniente de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

Del mismo modo a lo comentado sobre las perspectivas de aplicación para MIKE 21, el contexto de cambio y variabilidad del clima demandará la evaluación integral de potenciales modificaciones en la configuración costera, identificando sectores puntuales de la provincia de Buenos Aires que podrían demandar acciones para adaptación a los cambios

Dentro de ese enfoque, LITPACK constituye una herramienta eficiente para el análisis del impacto de diferentes escenarios futuros, contemplando predicciones de cambio para las variables hidrometeorológicas (fundamentalmente clima de olas, vientos y marea meteorológica) que constituyen los forzantes principales en la dinámica de los procesos litorales.

## 4 MODELOS COMPLEMENTARIOS PARA LA GESTIÓN DEL MANEJO COSTERO

Si bien uno de los ejes centrales de esta Asistencia Técnica consiste en la implementación de los modelos MIKE 21 y LITPACK, los cuales, por otra parte, resultan aptos para el estudio de un gran número de problemas que pueden presentarse en el manejo costero de la Provincia de Buenos Aires, en esta sección se identifican algunas herramientas numéricas que podrían ser utilizadas a modo de complemento en el desarrollo de los estudios. La complementariedad de estos modelos se basa en la libre disponibilidad de los mismos y el importante grado de avance tecnológico que han tenido en los últimos tiempos.

### 4.1 Delft-3D

El Delft-3D es un modelo numérico desarrollado por desarrollado por Deltares - Delft Hydraulics en los Países Bajos, y perfeccionada a través de una serie de versiones evolutivas a lo largo de los últimos 20 años<sup>2</sup>. Consiste en un sistema de modelación acoplado compuesto por varios módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, transporte de sedimentos, calidad de agua y transporte de sustancias en general.

El módulo principal, Delft-3D FLOW, permite resolver de manera bi y tridimensional flujos impermanentes, incluyendo los efectos de mareas, vientos, presión atmosférica, diferencias de densidad ocasionadas por temperatura o salinidad, olas, turbulencia y áreas inundables.

Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla, curvilínea u ortogonal, asumiendo las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno, es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el k-l o el k- $\epsilon$ .

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial horizontal del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, estados combinados en estuarios) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de ríos, estructuras hidráulicas, portuarias o costeras).

---

<sup>2</sup> <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

La integración temporal usada por el esquema de solución numérica (método Cyclic) se basa en el método ADI (*Alternating Direction Implicit*), esquema que no impone restricciones al intervalo temporal de cálculo. En el problema examinado se considerará un intervalo temporal apropiado y estimado con el cálculo de la condición CFL.

La implementación del módulo hidrodinámico Delft-3D FLOW presenta una amplia lista de posibilidades de aplicación, entre las que se pueden destacar:

- Flujos forzados por mareas y vientos (ondas de marea).
- Flujos estratificados y forzados por densidad.
- Simulaciones de caudales en ríos y canales.
- Simulaciones en lagos profundos y embalses.
- Simulación de tsunamis, saltos hidráulicos, y ondas de inundación.
- Descargas de ríos de agua dulce en bahías.
- Intrusión salina.
- Estratificación térmica en lagos, mares y embalses.
- Tomas de agua de enfriamiento y salidas de aguas residuales.
- Transporte de materiales disueltos y contaminantes.
- Transporte de sedimentos y morfología en línea.
- Flujo no hidrostático

El acoplamiento del módulo hidrodinámico con el resto de los módulos que componen el modelo Delft-3D ofrece la posibilidad de ampliar significativamente el área de aplicación de esta herramienta. Dichos módulos, también de uso libre, brindan las siguientes prestaciones:

- Delft3D-WAVE: propagación de olas e interacción con corrientes.
- D-Water Quality: calidad de agua de campo lejano.
- D-WAQ PART: calidad de agua en el medio campo y seguimiento de partículas.
- Delft3D-ECO: modelado ecológico.
- Delft3D-SED: transporte de sedimentos cohesivo y no cohesivo.

### ***Motivaciones para el uso de Delft-3D en este estudio***

Entre las ventajas que ofrece DELFT-3D se destaca que es un software de uso libre, de gran difusión en todo el mundo, y con una enorme cantidad de usuarios dentro de la comunidad científica que favorece su constante actualización y permite el intercambio de experiencias de manera activa a través de sus foros de discusión.

La recopilación de antecedentes presentada en las Actividades 2.1 y 2.2 de esta Asistencia Técnica ha mostrado una interesante cantidad de casos de aplicación destacados tanto en el ámbito internacional como en el ámbito local.

Dentro del primer grupo se destacan el estudio del incremento de la sedimentación en el estuario Guayas (Becker, 2017) realizado con el software Delft-3D FM; el trabajo de Hesse

(2017), donde se presenta el estudio de sedimentación en el estuario Weser (Alemania) y su impacto en las tareas de dragado en la zona; y el análisis de la dinámica de los sedimentos dragados en el Mar del Norte estudiado en Schuurman et al. (2017) utilizando Delft-3D y DELWAQ.

Por su parte, en ámbito local se destaca el estudio de Luteijn (2013), orientado a evaluar qué tipo de medidas adoptar para mejorar la accesibilidad del Puerto de Mar del Plata y reducir los costos de mantenimiento. Para identificar y cuantificar los procesos físicos que influyen en la accesibilidad al Puerto, un modelo hidrodinámico basado en Delft-3D FLOW se implementó y validó en el entorno de Mar del Plata. Además, debido a la falta de información de datos de olas sobre la costa, se utilizó el modelo Delft-3D WAVE aplicado a la zona costera, anidado a uno de mayor escala, con información del clima de olas costa afuera. La caracterización de las variables hidrodinámicas, tanto las de las corrientes como las del oleaje, permitió estimar el flujo de energía y la tasa de transporte potencial con las formulaciones del *Coastal Engineering Research Center* (CERC, 2002)

Asimismo, el INA cuenta con experiencia en la implementación de este software en dos casos recientes: el estudio de propagación de ondas de marea en estuarios patagónicos (INA 2018a), donde se aplicó una metodología de dominios anidados (Figura 4.1) abarcando toda la plataforma continental del mar argentino; y en la modelación local del Puerto de Buenos Aires (INA 2018b), donde se realizaron simulaciones numéricas de sedimentación y descargas térmicas en el interior del recinto portuario.

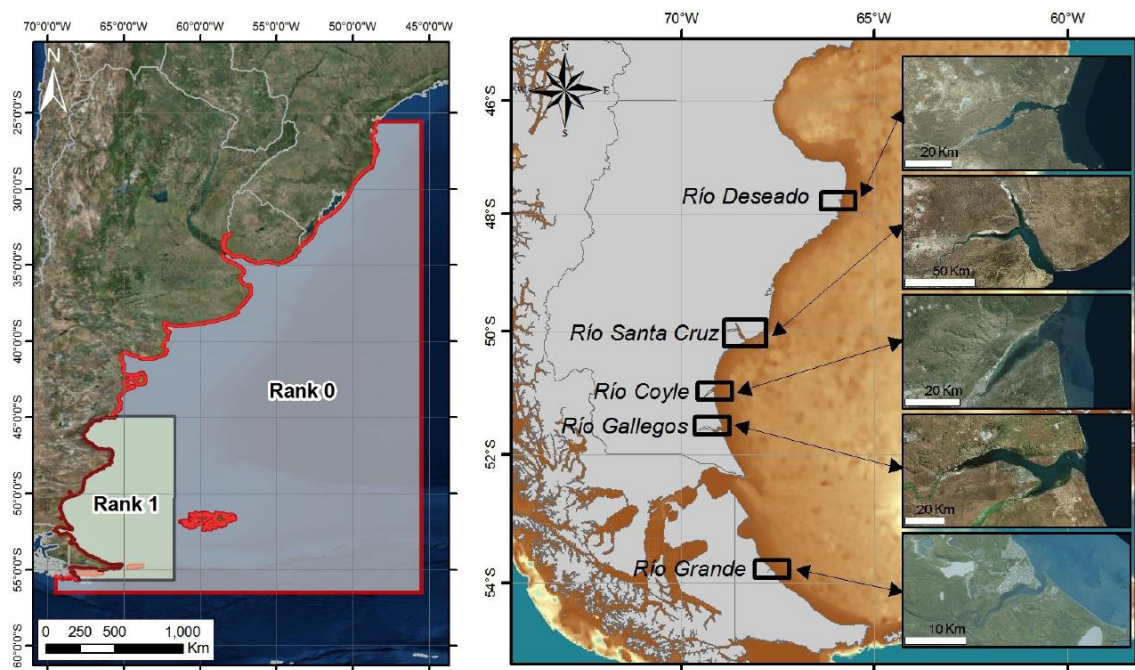


Figura 4.1. Modelos anidados para la aplicación de Delft-3D en la Patagonia argentina

La comparación entre el módulo hidrodinámico Delft-3D FLOW (módulo principal del software) y el paquete MIKE 21 adquirido por la DPH señala que ambos modelos presentan similares

características y ofrecen prestaciones equivalentes para la modelación hidrodinámica, sedimentológica y morfológica. En tal sentido, se destaca como una ventaja a favor de DELFT-3D la posibilidad de incorporar módulos adicionales para la modelación sin tener que recurrir al pago de una licencia, cubriendo algunos aspectos que eventualmente podrían ser de interés para la gestión de la DPH, como ser: el tema de calidad de aguas, el seguimiento de partículas y transporte de sustancias en general.

## 4.2 SWAN

SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), desarrollado en Delft University of Technology<sup>3</sup> de Holanda, es una herramienta utilizada ampliamente en el campo de la ingeniería de costas y cuenta con una numerosa lista de aplicaciones documentadas en la bibliografía internacional referidas a la modelación del oleaje en zonas de costa marítima, lagos y estuarios.

Se trata de un modelo de propagación de olas de tercera generación que permite obtener estimaciones realistas de los parámetros del oleaje en las zonas costeras, lagos y estuarios, teniendo en cuenta las condiciones del viento, del fondo y de la corriente. SWAN puede ser utilizado en cualquier escala adecuada para las olas de gravedad generadas por viento superficial.

El modelo se basa en la ecuación de onda que equilibra la acción con las fuentes y sumideros. Se utiliza en zonas donde sea necesario propagar el oleaje sobre grandes superficies oceánicas (generación de oleaje por viento) y no haya estructuras complejas

Dadas sus características, SWAN resulta eficiente para su uso en la gestión de puertos, el diseño de instalaciones “offshore”, el desarrollo y manejo costero, y diagnóstico y pronóstico de olas.

SWAN incluye la posibilidad de considerar una gran cantidad de los procesos a los que se ve sometido el oleaje durante su propagación:

- Generación de olas por acción del viento
- Propagación a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.
- Disipación por descrestamiento (*whitecapping*).
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad.
- Disipación inducida por la fricción del fondo.
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

Los procesos de propagación en modelos de tercera generación y específicamente el modelo SWAN, son la evolución en el espacio (x-y) que describe el desarrollo del espectro de energía

---

<sup>3</sup> <http://www.swan.tudelft.nl>

del oleaje, teniendo en cuenta las condiciones de viento, corrientes y batimetría, atendiendo a los procesos de generación, disipación e interacciones no lineales.

SWAN presenta algunas limitaciones: la difracción es modelada en sentido restringido, no tiene en cuenta la reflexión (aunque pueden modelarse obstáculos), y no calcula corrientes inducidas por el oleaje (pero sí pueden ser introducidas como entrada; por lo tanto calcula el efecto de la corriente en el oleaje, pero no al revés).

Esto implica que el modelo dará resultados de alta fiabilidad en zonas que: no presenten grandes obstáculos ni construcciones que produzcan mucha difracción, no presenten cambios bruscos de profundidad (reflexión), y abarquen una zona relativamente amplia, con resoluciones espaciales mayores a un orden de 10 m.

SWAN permite discretizar el dominio espacial en mallas que pueden anidarse. Los datos de oleaje se prescriben en una o varias de las aristas de la malla de mayor superficie. Para las mallas anidadas los datos se toman del espectro interpolado en la ejecución de la malla anterior.

### ***Motivaciones para el uso de SWAN en este estudio***

Al igual que en el caso de DELFT-3D, SWAN es un software de uso libre, de gran difusión en todo el mundo, y con una enorme cantidad de usuarios dentro de la comunidad científica que favorece su constante actualización y permite el intercambio de experiencias de manera activa a través de sus foros de discusión.

La recopilación de antecedentes también ha mostrado una interesante cantidad de casos de aplicación destacados tanto en el ámbito internacional como en el ámbito local.

A partir de estos se destaca que la propagación de olas sobre la costa bonaerense es una preocupación que ha requerido de variados estudios utilizando la modelación numérica de SWAN, tanto a escala regional como a escala local estudiando problemas particulares. Ejemplos de ello se pueden ver en: Dragani et al. (2010 y 2013), Codignotto et al. (2011, 2012), y Echevarria et al. (2018), entre otros.

El INA también posee una vasta experiencia en su implementación con una importante cantidad de estudios realizados a lo largo de la costa patagónica y en la provincia de Buenos Aires. Ejemplos recientes constituyen los casos de caracterización de clima de olas en el Puerto de Buenos Aires (INA 2018b) y la evaluación preliminar del potencial de energía undimotriz en Quequén (Tomazin, 2016), donde los resultados de la modelación del oleaje realizada con SWAN fueron contrastados con la medición de un olígrafo y con datos satelitales (Figura 4.2)

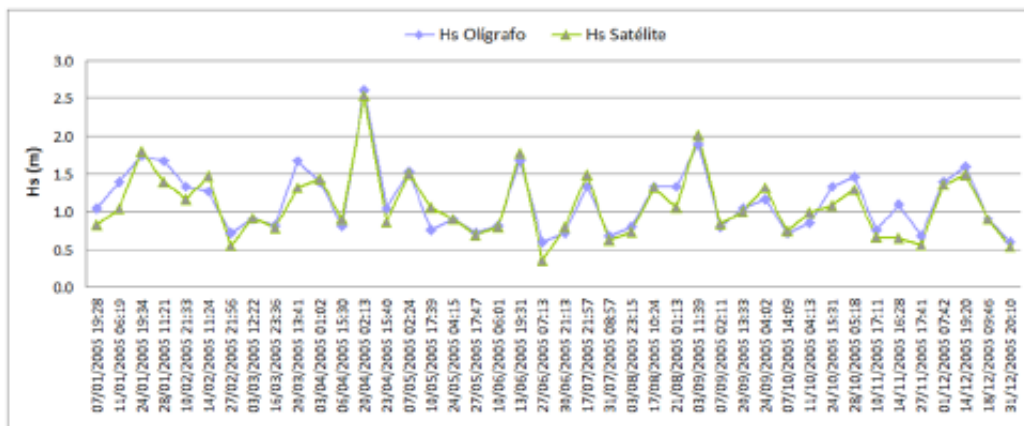


Figura 4.2. Resultados de la implementación de SWAN en el área del puerto de Quequén

Si bien MIKE21 SW y SWAN ofrecen el mismo tipo de prestaciones, una ventaja del segundo consiste en que brinda la posibilidad de acoplamiento directo con un modelo hidrodinámico (Delft-3D). En caso de optar por este modelo para alguna aplicación puntual, la disponibilidad de SWAN para dicho acoplamiento puede constituir un aporte beneficioso.

Un uso concreto dentro de esta Asistencia Técnica puede ser el desarrollo de un modelo regional (acoplado fácilmente a un modelo global) que posibilite generar condiciones de borde (oleaje) a la modelación local.

### 4.3 XBeach

Deltares, junto con UNESCO-IHE y TU Delft, han desarrollado el modelo numérico de código abierto y gratuito XBeach<sup>4</sup>. El modelo se utiliza para el cálculo de la hidrodinámica cerca de la costa y la respuesta morfodinámica bajo condiciones de tormenta, evaluando procesos como el de la erosión de dunas.

XBeach es un modelo numérico bidimensional que simula el impacto de eventos extremos sobre playas de arena en un dominio computacional del orden local (1 a 5 kilómetros) y escala temporal de tormenta (horas/días).

Este modelo incluye procesos hidrodinámicos de transformación de oleaje, refracción, rotura, propagación y disipación, *run-up* e inundación. Asimismo permite incluir el impacto sobre estructuras y vegetación.

El modelo XBeach se puede utilizar de dos maneras: un modo hidrostático y un modo no hidrostático. En el modo hidrostático, la variación de la amplitud de onda corta se resuelve por separado de las ondas largas, las corrientes y el cambio morfológico. Esto ahorra un tiempo de cómputo considerable, con el costo de que la fase de las ondas cortas no se simule. Un modelo

<sup>4</sup> <https://www.deltares.nl/en/software/xbeach/>

más completo es el modelo no hidrostático que resuelve todos los procesos, incluidos los movimientos de onda corta, pero con una mayor demanda computacional.

Esta herramienta consiste en una serie de fórmulas que representan la propagación de onda corta, ecuaciones no estacionarias para aguas someras, ecuaciones para transporte de sedimentos y la variación de la batimetría, implementadas para estimar la propagación del oleaje, la velocidad de corrientes y los cambios morfológicos en sectores de la costa de interés a definir

XBeach se basa en cuatro rutinas o módulos principales que se señalan a continuación y que son ilustrados en el esquema de la Figura 4.3: módulo de olas (Wave), módulo de niveles y corrientes (Flow), Módulo de sedimentos (Sediment Module) y módulo morfológico (Morpho Module).

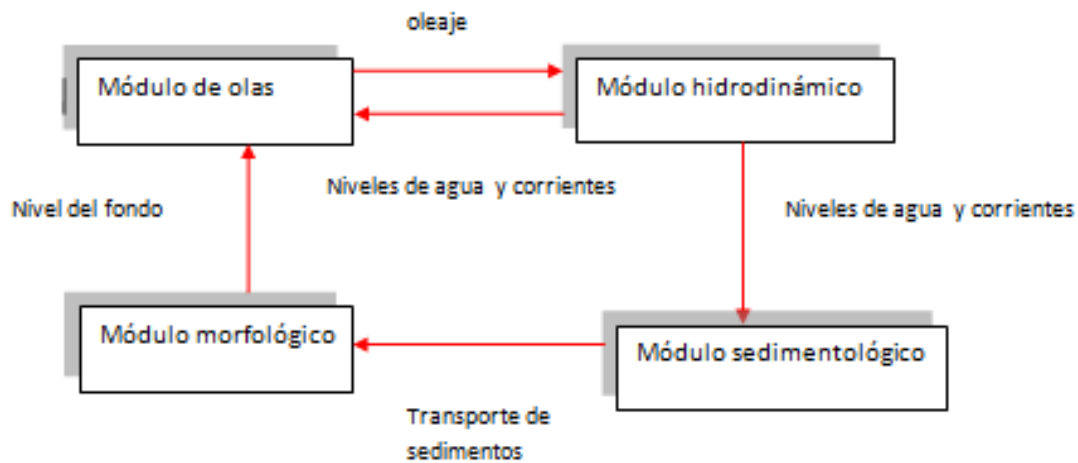


Figura 4.3. Funcionamiento esquemático del modelo XBeach.

XBeach resuelve el balance de acción de onda corta dependiente del tiempo en la escala de grupos de ondas. La distribución direccional del espectro de densidad de acción de onda corta se tiene en cuenta en el modelo, mientras que el dominio de frecuencia se representa mediante una única frecuencia de pico representativa, suponiendo un espectro incidente de banda estrecha (c.f. Goda, 1985).

Usando estas formulaciones de acción de onda, es posible resolver las ondas de infragravedad propagadas direccionalmente y las corrientes variables en el tiempo.

### **Motivaciones para el uso de XBeach en este estudio**

Del mismo modo que en el caso de los modelos anteriores de este capítulo, se destaca también su condición de uso libre y la gran difusión que ha tenido durante los diez años que lleva este software dentro de la comunidad científica internacional.

En este sentido, se ha identificado una importante cantidad de referencias vinculadas a la implementación de XBeach orientadas al manejo costero. Como casos destacados de mencionan: Caichac et al. (2017), presentando la aplicación de un modelo morfológico acoplado con un modelo hidrodinámico (XBeach con Delft-3D FM) para estudiar la evolución de la zona costera de Anmok (Corea del Sur); Cueto Fonseca y Otero Díaz (2018), con objetivo de describir la respuesta morfodinámica de las playas del Caribe colombiano ante eventos extremos de oleaje, en este caso específico el paso del frente frío de marzo de 2009 y el Huracán Matthew en las playas de Bocagrande (Cartagena, Bolívar) y Costa Verde (Ciénaga, Magdalena); Kuc Castilla (2018), quien se centra en la detección y el análisis de los cambios históricos de la costa así como en la caracterización hidrodinámica en la playa de Sabancuy (México); y en el ámbito local Alonso et al. (2018), donde exploraron a través de modelación numérica el rol de los meteotsunamis (tsunamis meteorológicos, producidos por procesos atmosféricos) en la erosión de playas de arena en la provincia de Buenos Aires.

La importancia sobre la recomendación para el uso de este modelo en el desarrollo de esta Asistencia Técnica radica en que XBEACH ofrece la posibilidad de evaluar los efectos morfológicos generados por la acción de eventos extremos (fuerte oleaje con marea meteorológica) con una descripción temporal de detalle que no puede resolver con la misma eficiencia el modelo MIKE 21.

Distintos autores han destacado y documentado la sensibilidad y la vulnerabilidad de algunos sectores de la costa bonaerense frente a la acción de las sudestadas: Isla (2006), Codignotto (2010), López y Marcomini (2010). Este hecho pone en evidencia la importancia de contar con una herramienta para la evaluación de estos fenómenos, y en ese sentido, el modelo XBEACH se presenta como el modelo más apropiado para este tipo de aplicación.

## 5 CONCLUSIONES

Las evaluaciones realizadas sobre las características de los modelos desarrollados por el DHI con los que cuenta la DPH (Sistema MIKE 21 y Sistema LITPACK), junto con la revisión de experiencias locales e internacionales referidas a casos de aplicación en contextos similares, indican que las versiones de estos modelos adquiridas en 2013 reúnen las condiciones necesarias para llevar adelante los estudios requeridos para esta Asistencia Técnica.

El análisis sobre las perspectivas de aplicación para ambos sistemas de modelación mostró que las problemáticas identificadas a priori para el ámbito de la zona costera de la provincia de Buenos Aires pueden ser perfectamente abordadas con las herramientas numéricas disponibles. Una prueba de ello lo constituyen los estudios realizados por Cáceres et al (2012, 2016) utilizando los mismos modelos.

En este contexto, las versiones de MIKE 21 y de LITPACK de las que dispone la DPH no requieren una actualización inmediata para el desarrollo de los estudios de que son de interés. Al mismo tiempo se considera que estas herramientas resultan apropiadas para el entrenamiento del personal de la DPH y la transferencia de conocimientos por parte del INA. La actualización de este software puede postergarse hasta que la ejecución de algún proyecto específico lo demande, o bien, cuando requerimientos de hardware o sistema operativo incompatible con su uso lo hagan indispensable.

En consecuencia, las versiones de MIKE 21 y de LITPACK adquiridas en 2013 serán aplicadas en el desarrollo de la Actividad 4.3 de esta Asistencia Técnica para la evaluación del impacto de escenarios de cambio climático sobre sectores localizados de la costa mediante el desarrollo de modelos de alta resolución (Actividad 4.3.2). Estas modelaciones estarán orientadas a evaluar riesgos de erosión e inundación, además de estudiar potenciales medidas para la adaptación a los cambios del clima. Los sitios de interés para el estudio serán identificados previamente en el desarrollo de la Actividad 4.3.1, de acuerdo al grado de vulnerabilidad que presenten los diferentes tramos que componen la costa bonaerense.

Como recomendación final se señala la importancia de contemplar el uso de herramientas de modelación complementarias, tanto en el desarrollo de la Asistencia Técnica como para aplicaciones posteriores que pueda desarrollar la DPH. Los modelos recomendados en este informe (DELFT3D, SWAN, y XBEACH) constituyen herramientas de libre uso y son ampliamente reconocidos en la comunidad científico-técnica internacional. Su implementación resulta compatible con el uso de los modelos del DHI y presentan la ventaja de permitir el estudio de algunas cuestiones puntuales que podrían ser del interés en el ámbito costero y no se encuentran incluidas dentro de las herramientas actuales de las que dispone la DPH, como ser los temas referidos a la calidad del agua y el transporte de sustancias contaminantes.

### Referencias

- Abdollahzadeh moradi, Y., Erdik, T., Özger, M., Altunkaynak, A., 2014. Application of MIKE 21 SW for wave hindcasting in Marmara Sea Basin for the year 2012. Conference: 11th International Congress on Advances in Civil Engineering- ACE 2014.
- Alfredini, P., Arasaki, E., Pezzoli, A., Arcorace, M., Cristofori, E., Cabral de Sousa Jr., W., 2014. Exposure of Santos Harbor Metropolitan Area (Brazil) to Wave and Storm Surge Climate Changes. Water Qual Expo Health. DOI 10.1007/s12403-014-0109-7.
- Alonso, G., Dragani, W.C., Pérez, I., 2018. The role of meteorological tsunamis on beach erosion in the Buenos Aires coast: some numerical experiments. Coastal Engineering Journal, DOI: 10.1080/21664250.2018.1520794
- Ari Güner, H.A.; Yüksel, Y., and Çevik, E.Ö., 2013. Longshore sediment transport - field data and estimations using neural networks, numerical model, and empirical models.
- Ari Güner, H.A., Yüksel, Y. and Çevik, E.Ö., 2016. Numerical investigation of the impact of a groin system on shoreline evolution. Proceedings of 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.9753/icce.v35.sediment.3>
- Cáceres, R.A., Castellano, R.D., 2012. Dinámica litoral en el entorno de la Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata. VII Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Cáceres, R.A., 2016. Criterios de selección del clima de olas para el diseño de defensas de costas. IX Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Cáceres, R.A., Zyserman, J.A., Perillo, G.M.E., 2016. Analysis of sedimentation problems at the entrance to Mar del Plata Harbor. Journal of Coastal Research, 32(2), 301–314. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Codignotto, W., Dragani, W., Martin, P., Campos, M., Alonso, G., Simionato, C., Medina, R., 2011. Erosión en la bahía de Samborombón y cambios en la dirección de los vientos, provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, 13 (2), 135-138.
- Codignotto, W., Dragani, W., Martin, P., Simionato, C., Medina, R., 2011; y Alonso, G., 2012. Wind-wave climate change and increasing erosion in the outer Río de la Plata, Argentina. Continental Shelf Research Vol. 38: 110-116.
- Codignotto, J.O., 2010. Áreas costeras y erosión en Argentina. 4to Seminario Internacional de Desarrollo Costero Sustentable. Pinamar, Argentina.
- Cueto Fonseca J. E., Otero Díaz L. J., 2018. Respuesta morfodinámica de las playas del Caribe colombiano ante eventos extremos de oleaje. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.
- Deltares, 2014. Delft3D-Flow, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual, Version 3.15.34158, May, 684 pp.
- DHI, 2012a. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 52p.
- DHI, 2012b. MIKE 21 Spectral Wave Module. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 66p.
- DHI, 2012c. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 66p.

- DHI, 2012d. Marine Climate Change Guidelines. How to obtain sustainable adaptation in marine areas [Erichsen, A.; Rugbjerg, M.; Mangor, K. y Deigaard, R. (eds.)] Horshølmø, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 77p.
- Dragani, W.C., Martin, P.B., Simionato, C.G., Campos, M.I., 2010. Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32°S and 40°S? *Continental Shelf Research*, 30(5), 481–490. DOI: 10.1016/j.csr.2010.01.002
- Dragani, W.C., Martin, P.B., Alonso, G., Codignotto, J.O., Prario, B.E., Bacino, G., 2013. Wind wave climate change: Impacts on the littoral processes at the Northern Buenos Aires Province Coast, Argentina. *Climatic Change*, 121 (4), 649–660. DOI: 10.1007/s10584-013-0928-8
- Echevarría, E.R., Dragani, W.C., Wörner, S., 2018. A comprehensive study about alongshore wave energy flux in the coast of Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Conservation*. DOI: 10.1007/s11852-018-0673-2.
- Fredsøe, J., 1984. Turbulent Boundary Layer in Wave-current Motion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (8), DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:8(1103).
- Hendriyono, W., Wibowo, M., Al Hakim, B., Catur Istiyanto, D. Modeling of Sediment Transport Affecting the Coastline Changes due to Infrastructures in Batang - Central Java. *Earth and Planetary Science Elsevier*, 2015
- Instituto Nacional del Agua (2018a). Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica. Informe LHA 01-372-18.
- Instituto Nacional del Agua (2018b). Estudios hidráulicos para la modernización del Puerto de Buenos Aires. Informe Final, LHA 05-366-18.
- Isla, F.I., 2006. Erosión y defensa costeras. In: Isla, F.I y Lasta, C.A. (eds.), *Manual de Manejo costero para la provincia de Buenos Aires*. Mar del Plata, Argentina: EUDEM, pp. 125-147.
- Kuc Castilla, A.G., Mendoza E., Posada Vanegas G., Silva Casarín R., 2018. Caracterización morfológica e hidrodinámica de la playa Sabancuy en Campeche, México. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, Septiembre.
- López, R. A. y Marcomini, S. C., 2010. Acciones en costas erosivas. 4to Seminario Internacional de Desarrollo Costero Sustentable (Pinamar, Argentina), 12p
- Luteijn, J.M., 2013. Study on Sedimentation and Effects of Mitigating Measures at Port of Mar del Plata, Argentina. M.Sc. Thesis Final Report, Delft University of Technology, pp. 163.
- Menéndez, A.N., Badano, N.D., Lopolito, M.F., Re, M., 2013. Water quality assessment for a coastal zone through numerical modeling. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1 (1), DOI: 10.1080/23249676.2013.827892
- Samaras, A.G., Gaeta, M.G., Miquel, A.M., Archetti, R. (2016). High-resolution wave and hydrodynamics modelling in coastal areas: operational applications for coastal planning, decision support and assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Science*, 16, 1499–1518
- Tomazin, N., 2016. Methodology for the assessment of wave energy potential combining numerical modeling and buoy data. 2nd International Seminar on Marine Energies, SIEMAR 2. Buenos Aires, Argentina, November.